

MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS

(Basado en WORLD CLIMATE APPLICATIONS PROGRAMME - WMO, *GUIDELINES ON CROP-WEATHER MODELS* and *CROP-WEATHER MODELLING COURSE*. Israel 1988-1989)

Un «modelo» es básicamente una ecuación o conjunto de ecuaciones que nos describen un sistema físico (modelos físicos), o esquematizan los resultados de la evolución del sistema (modelos empíricos). En el caso particular de los modelos agrometeorológicos, el objetivo es calcular el rendimiento final de un cultivo, en kg/ha, en función de los valores que toman una serie de parámetros meteorológicos (precipitación, temperatura, ET, etc.), si bien frecuentemente intervienen factores diferentes, como pueden ser los edafológicos, morfológicos y otros.

En su forma más simple, los datos climáticos pueden ser analizados para suministrar información sobre el objetivo propuesto. Por ejemplo, los datos meteorológicos pueden ser comparados con los del año anterior, con la media de varios años, o con los correspondientes a años en que se han producido máximos o mínimos rendimientos en la cosecha. Estos procedimientos elementales suelen ser usados, por ejemplo, en países en vías de desarrollo, en los que los datos disponibles tanto climáticos como sobre cosechas son muy limitados.

La utilidad de estos modelos será tanto mayor cuanto mayor sea la correlación entre los factores meteorológicos simples (por ejemplo la precipitación) y los rendimientos de las cosechas. Normalmente los resultados así obtenidos nos dan sólo una información relativa, con un alto margen de error, el cual disminuye a medida que añadimos nuevos datos.

Cuando el número de datos meteorológicos disponibles es suficiente, es posible traducir el sistema cultivo-medio ambiente a términos cuantitativos, descritos por los modelos.

Tres son los tipos fundamentales de modelos:

- Modelos estadísticos empíricos.
- Modelos físico-estadísticos.
- Modelos dinámicos.

Evitando entrar en el tratamiento matemático en que se basan estos modelos, trataremos únicamente de describir algunas de sus características.

Modelos estadísticos empíricos

Un modelo clásico de este tipo es el de R. Fisher (1924). Fisher demuestra que cuando el número de factores que potencialmente influyen en el proceso es de un cierto orden, el número de observaciones debe ser también del mismo orden o superior, lo que nos lleva al concepto de grados de libertad. W. M. Obuhov (1949) hace uso del análisis de regresión múltiple para estudiar las influencias de las condiciones meteorológicas sobre el rendimiento de las cosechas. Este tipo de análisis es utilizado muy frecuentemente en modelos del tipo de regresión lineal.

Los factores que intervienen en este tipo de modelos incluyen condiciones meteorológicas, promediadas sobre etapas fenológicas u otros períodos de tiempo; ciertas condiciones del cultivo, tales como altura de la planta, fitomasa, cantidad y distribución del área foliar, etc.; información sobre las características del suelo; y, en algunos modelos, información sobre las prácticas de cultivo tales como cantidad y tipo de los fertilizantes utilizados; tratamientos fitosanitarios; frecuencia y cantidad de la irrigación para los cultivos de regadío; y otros.

Una vez establecidos los factores que se van a tener en cuenta, se determinan los coeficientes mediante análisis de regresión. Lógicamente los valores encontrados para estos coeficientes son válidos para el emplazamiento del que proceden los datos y los resultados no pueden extenderse a otras áreas. Esta es una de las más duras limitaciones de todos los modelos agrometeorológicos, el hecho de que una vez establecido el modelo y ajustados al máximo sus coeficientes y parámetros, la fiabilidad del modelo está limitada al cultivo para el que fue diseñado y al área a que corresponden los datos utilizados en el ajuste.

El uso del análisis de regresión puede estar limitado por la falta de datos suficientes, en particular sobre el rendimiento de cosechas, y por la falta de homogeneidad y consistencia de estos datos. Las nuevas variedades de cultivos, el incremento del uso de fertilizantes químicos, y en general los avances tecnológicos de todo tipo, hacen que las series históricas de datos sobre rendimientos presenten un fuerte sesgo.

Un problema especial que puede presentarse con las técnicas de regresión múltiple es el de la multicolinealidad, es decir, la posible existencia de marcadas correlaciones entre las variables tomadas como independientes, lo que puede dar lugar a errores en la selección de variables por métodos estadísticos.

Ante este tipo de problemas deben utilizarse técnicas especiales, que en nuestro caso podría ser el análisis en componentes principales. La sustitución del conjunto inicial de variables por otro basado en funciones ortogonales no correlacionadas, nos permitirá aplicar las técnicas de regresión múltiple para determinar cuáles de ellas nos aportan la mayor información. A partir de ellas se establecerá la ecuación de regresión final.

En cuanto al problema de la limitación de los modelos actuales a un tipo de cultivo y a una localización determinada, una vía de solución que parece muy prometedora es la utilización de modelos en los que los datos de entrada no sean las observaciones puntuales utilizadas convencionalmente, sino los valores obtenidos a través de la teledetección, en particular desde satélite, que, por sus propias características, son valores promediados para toda el área de observación del instrumento, lo que unido a la frecuencia de las observaciones disponibles (dependiente del tipo de satélite) y a la cobertura y definición espaciales permitirán la utilización de modelos más generales, si bien es cierto que, al menos durante los primeros ensayos, esta generalización en las aplicaciones se hará a costa de la exactitud en los resultados.

Con los modelos actualmente operativos se obtienen con frecuencia predicciones bastante aceptables (en torno al 15 % de error máximo) de rendimientos de cosechas a partir de series de datos relativamente cortas (del orden de 15 años).

Modelos físico-estadísticos

Estos modelos intentan describir matemáticamente, mediante análisis de regresión, los procesos que tienen lugar en el cultivo hasta alcanzar el rendimiento final.

Baier (1973) propone un modelo en el que el rendimiento final de la cosecha, o bien el rendimiento de las partes de la planta evaluables económicamente en una etapa dado del desarrollo, viene dado en función de los valores que van tomando las variables seleccionadas para el proceso. Estas variables, en cuanto se refiere al aspecto meteorológico, son, en la mayoría de los modelos de este tipo, los valores de las temperaturas extremas, máxima y mínima, del aire, la humedad del suelo, la razón entre la ET (EvapoTranspiración) real y la potencial o la radiación global. Y, aún más frecuentemente, alguna combinación de las cinco variables citadas.

Un ejemplo concreto de este tipo de modelos es el Modelo Tri-Cuadrático, propuesto por el propio Robertson, conocido también como BMTSM (BioMeteorological Time Scale Model) en el que intervienen funciones cuadráticas de las temperaturas extremas y de la duración teórica del día.

Modelos dinámicos

En muchos países se han desarrollado modelos dinámicos para determinados cultivos (ver tabla 1.1). Se han utilizado programas informáticos para calcular la dinámica de la acumulación de fitomasa, así como de la evolución fenológica del cultivo durante todo el período de crecimiento.

Los modelos dinámicos difieren apreciablemente unos de otros según sus objetivos. Las diferencias están tanto en el detalle con que describen los procesos individuales, como en la cantidad y tipo de los datos que requieren. No obstante, en los modelos dinámicos suele presentarse una estructura común para las ecuaciones diferenciales, de forma que la ecuación nos da como valores de salida la estimación de materia seca de hojas, tallos, raíces y órganos reproductivos para un tiempo futuro, a partir de sus valores en el momento actual, y a través de una función en la que además de las variables meteorológicas intervienen otras propias de las características del terreno y de las técnicas de cultivo utilizadas.

Este tipo de modelos en los que el estado futuro se obtiene escalonadamente a partir del actual, basan buena parte de la exactitud de sus resultados en la fiabilidad del muestreo que permita el conocimiento del estado actual del cultivo. Ahora bien, todo muestreo de campo conlleva el riesgo de resultar sesgado, y por otra parte resulta evidente que cuanto mayor sea el número y la dispersión espacial de las muestras, tanto menor será el sesgo; pero entonces al elevar y dispersar el número de muestras, nos encontramos con que el muestreo puede resultar enormemente laborioso, lo que encarece y retrasa el proceso. Pues bien, es aquí donde nuevamente la teledetección satelitaria puede proporcionar una valiosa ayuda al permitir, gracias a su cobertura espacial global, una muestra igual a la población, y con una precisión en su definición que puede alcanzar a parcelas de 20×20 metros (SPOT).

Una propiedad fundamental de los modelos dinámicos es el hecho de que la duración del período a que se refieren los cálculos (meses, estaciones, etapas fenológicas) y también el escalón temporal establecido (hora, día) no afectan al número de los coeficientes. El modelo dinámico queda determinado simplemente por el grado

Tabla 1.1

Modelos dinámicos para cosechas agrícolas

Cultivo	País	Fuente
Cebada, Primavera	URSS	Sirotenko, 1981
Col (repollo)	U.K.	Barnes et al., 1976
Trébol	Australia	Fulai et al., 1978
Algodón	USA	Duncan, 1971
Algodón	USA	Gutiérrez et al., 1975
Algodón	USA	McKinion et al., 1975
Algodón	USA	Stapleton et al., 1973
Lechuga	U.K.	Greenwood et al., 1974
Alfalfa	Australia	Byrne et al., 1969
Alfalfa	USA	Holt et al., 1975
Alfalfa	URSS	«Metodika», 1979
Maíz	USA	Curry et al., 1971
Maíz	USA	Duncan, 1973
Maíz	URSS	Galjamin, 1981
Maíz	USA	Splinter, 1974
Maíz	Holanda	De Wit et al., 1978
Patata	URSS	Zabroda et al., 1979
Centeno, Invierno	URSS	Polevoj et al., 1979
Sorgo	USA	Arkin et al., 1978
Sorgo	Australia	Cocks et al., 1978
Soja	USA	Curry et al., 1975
Remolacha	USA	Fick et al., 1973
Remolacha	U.K.	Patfield et al., 1971
Girasol	Japón	Horie et al., 1977
Trigo, Primavera	URSS	Galjamin, 1981
Trigo, Invierno	URSS	Polevoj et al., 1979
Trigo, Invierno	USA	Rickman et al., 1975

de detalle con que se describe el proceso. Esta propiedad diferencia los modelos dinámicos de los de otro tipo, por ejemplo de los que utilizan ecuaciones de regresión, en los cuales el número de coeficientes estimados depende, además del número de factores, del período sobre el que se promedian y de la duración del período de crecimiento. Así, con un período de promedio de 10 días y calculando coeficientes para dos factores (por ejemplo temperatura y precipitación) para un período de crecimiento de 120 días, el estimador puede incluir 24 coeficientes de regresión.

Método para diseñar un modelo

El diseño de un modelo matemático para un sistema dinámico se desarrolla en los siguientes pasos:

- a) Definición del objetivo del modelo.
- b) Definición del sistema y sus límites.
- c) Desarrollo de la estructura del modelo con suficiente exactitud para los parámetros desconocidos.
- d) Solución del problema de identificación de parámetros por el modelo sobre la base de todos los datos disponibles (representación física, resultados de las experiencias en laboratorio, y datos de las observaciones de campo).
- e) Utilización de los resultados experimentales para determinar el rango de valores de las variables de entrada y salida. Aquí es necesario asegurarse de que el espectro de valores de entrada para las variables que influyen en el crecimiento no es más estrecho que el espectro de los valores de salida cuando se usa el modelo, puesto que, en caso contrario, podrían presentarse problemas en los procesos de retroalimentación.
- f) Verificar la adecuación del modelo analizando los resultados de los experimentos numéricos para el desarrollo completo del proceso contemplado por el modelo. A veces puede resultar difícil separar los dos pasos, «diseño» y «verificación», del modelo.

Después de diseñar la primera versión y analizar los resultados de los cálculos, es inevitable la aparición de errores, lo que obligará a introducir cambios en la estructura del modelo. Cambios que a su vez requieren estudio y verificación, y así sucesivamente.

Es importante «reservar» un bloque de datos independientes, separado de aquellos que se hacen intervenir en la construcción y ajuste del modelo, para que las pruebas, y sobre todo las verificaciones finales, puedan hacerse con esos datos.

Datos de entrada para modelos dinámicos

La posibilidad de utilizar o no un determinado método de cálculo depende en gran medida de la naturaleza y cantidad de datos iniciales que se requieren para el cálculo.

Los datos necesarios para los modelos dinámicos descritos anteriormente se pueden dividir en cuatro grupos:

- a) Constantes de tiempo y lugar.
- b) Coeficientes del suelo.
- c) Coeficientes del cultivo.
- d) Datos meteorológicos.

Las constantes del grupo a) incluyen, entre otros valores, coordenadas geográficas del lugar al que se refieren los cálculos, fecha, número de intervalos temporales (generalmente días) entre el comienzo de los cálculos en un instante cero arbitrario, tiempo biológico, y el total de las temperaturas efectivas desde la germinación hasta la maduración.

Los coeficientes del suelo del grupo b) tienen en cuenta las propiedades fisicoquímicas del suelo en la zona a que se refieren los cálculos. Deben incluir la cantidad de agua disponible en determinadas capas preseleccionadas en el perfil del suelo. El grado inicial de humedad puede ser especificado, si se conoce, o el submodelo que calcula la humedad se pondrá en marcha después de que una precipitación suficientemente intensa llene el perfil del suelo. El submodelo de humedad del suelo puede también ponerse en marcha hasta que se alcance la estabilidad.

Los coeficientes del cultivo del grupo c), responden a la tasa de acumulación de materia seca para las distintas variedades. Pueden también incluirse otros coeficientes que afectan al crecimiento del cultivo y sus tasas de desarrollo. En el grupo d) se incluirán los datos de las observaciones meteorológicas diarias, cantidad de precipitación, temperaturas extremas, tensión del vapor, horas de sol, etc.

Adolfo Marroquín Santoña
Meteorólogo
CMZ de Badajoz